УДК 530.12,   PACS 04.20.-q

К вопросу о физическом смысле преобразований Лоренца и теории относительности

Н.И.Кухаренко, МФТИ, ФАЛТ, выпуск 1975г.

140182, г.Жуковский Московской области,

e-mail – n_kuharenko@mail.ru

«Математика - это единственный совершенный метод водить самого себя за нос.»

А. Эйнштейн.

«Истина всегда оказывается проще, чем можно было предположить.»

Р. Фейнман.

Аннотация.

Работа проведена с целью выяснения физического смысла преобразований Лоренца, а также специальной и общей теории относительности. Для этого были рассмотрены некоторые следствия теории относительности для ситуаций, связанных с наблюдениями за покоящимися объектами с помощью света со стороны движущихся наблюдателей.

В результате анализа рассмотренных ситуаций сделан вывод о том, что преобразования Лоренца описывают именно «наблюдательные», оптические эффекты (в каком-то смысле аналогичные некоторым другим оптическим эффектам, в частности, эффекту Допплера), связанные с конечностью скорости света и независимостью её от выбора инерциальной системы координат. Такое понимание физического смысла преобразований Лоренца а также теории относительности согласуется со всеми наблюдаемыми эффектами, которые считаются доказательствами её справедливости, а также позволяет сделать теорию относительности совместимой с обыкновенным здравым смыслом.

Ключевые слова: преобразования Лоренца, специальная теория относительности, общая теория относительности, наблюдатель, интервал.

Введение.

Как известно, теория относительности А.Эйнштейна обычно не является простой для понимания. Так, например, в известном учебнике физики Джея Орира ([12]) во введении к главе 8 "Релятивистская кинематика"на стр. 136, 137 можно прочитать: «...Мы увидим, что теория относительности противоречит здравому смыслу и повседневному опыту. Поэтому при первом знакомстве с ней трудно поверить, что она может оказаться правильной. Однако с философской точки зрения важно тщательно исследовать данную ситуацию. Даже сегодня можно встретить образованных людей, не признающих всех выводов теории относительности. Это - первый пример явлений природы, очевидным образом противоречащих здравому смыслу».

По-видимому, вопрос о физическом смысле преобразований Лоренца и теории относительности волнует физиков практически с момента создания теории относительности. Так, например, в книге М.Борна "Эйнштейновская теория относительности" ([7]) есть параграф с названием "Видимость и действительность", есть статья А.Эйнштейна под названием "Физика и реальность" 1936 года ([3]), на русском языке существует сборник работ А.Эйнштейна под названием "Физика и реальность" ([4]), включающий эту статью.

Данная работа проведена с целью выяснения физического смысла преобразований Лоренца, а также специальной и общей теории относительности. Для этого были рассмотрены некоторые следствия специальной и общей теории относительности для различных ситуаций, связанных с наблюдениями за покоящимися объектами с помощью света со стороны движущихся наблюдателей.

1. О физическом смысле специальной теории относительности.

Рассмотрим, что будет наблюдать космонавт, использующий для наблюдений световые сигналы, летающий на небольшом космическом корабле в окрестности космической станции, которая движется без ускорения вдали от гравитирующих тел. Если скорость корабля относительно станции равна нулю, то, естественно, космонавт на корабле будет видеть, что ход часов на станции совпадает с ходом часов на его корабле, и длины всех метровых линеек на станции также совпадают с длинами метровых линеек на корабле. Увеличив скорость своего корабля относительно станции, наблюдатель в корабле увидит, в соответствии с преобразованиями Лоренца ([5], стр. 26), сокращение линейных размеров тел на станции и самой станции (вдоль вектора относительной скорости) и замедление хода часов на станции относительно часов на его корабле. Таким образом, изменяя скорость своего корабля, наблюдатель на корабле меняет видимые (наблюдаемые) свойства тел и процессов на станции. При этом, очевидно, что никакого влияния на состояние станции и предметов на станции он не оказывает.

Если в некоторой окрестности от той же космической станции летят несколько космических кораблей с различными скоростями относительно станции, то в каждом корабле космонавт будет наблюдать соответствующее его скорости относительно станции сокращение линейных размеров (в направлении относительной скорости) и соответствующе замедление хода часов на станции. В то же время наблюдатели на самой станции, а также в тех кораблях, скорости которых относительно станции равны нулю, будут наблюдать отсутствие сокращений линейных размеров и замедления хода часов. Более того, если корабли летят не в параллельных направлениях, то в каждом корабле космонавты будут наблюдать соответствующее направлению и величине его скорости относительно станции искажение формы предметов на станции и формы самой станции.

Приходится сделать вывод, что описываемые преобразованиями Лоренца изменения линейных размеров тел на станции и самой станции и

замедление хода часов на станции, наблюдаемые космонавтами на кораблях, являются именно оптическими (наблюдательными) эффектами, связанными с конечностью скорости света и независимостью её от движения системы координат. По-видимому, можно сказать, что эти оптические (наблюдательные) эффекты в какой-то степени аналогичны и некоторым другим оптическим эффектам, таким, например, как эффект Допплера.

Следует отметить, что сам автор теории относительности, А.Эйнштейн, как правило, когда пишет о сокращении линейных размеров движущихся тел (линеек) вдоль вектора относительной скорости для неподвижных наблюдателей, или о замедлении хода движущихся часов, отмечает, или даже подчёркивает, для каких именно наблюдателей это имеет место ([1], [2]). Например, в работе "Теория относительности" ([2], стр.420) он пишет: "...Если стержень в покое обладает длиной l', то при движении со скоростью v вдоль своей оси он будет обладать с точки зрения несопутствующего наблюдателя меньшей длиной $l = l'\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$, тогда как для сопутствующего наблюдателя длина стержня, как и прежде, равна l'." Там же, чуть дальше, на той же странице: "...Обобщая, можно сделать вывод: всякий процесс в некоторой физической системе замедляется, если эта система приводится в поступательное движение. Однако это замедление происходит только с точки зрения несопутствующей системы координат." Понятно, что здесь всего лишь шаг до вывода о физическом смысле этого явления, как об оптическом ("наблюдательном") эффекте, обусловленном несовершенством нашего средства наблюдения, а именно конечностью скорости света.

2. О физическом смысле общей теории относительности.

Аналогичные соображения можно привести и об общей теории относительности. Рассмотрим примерно ту же ситуацию с космонавтом, летающим на небольшом космическом корабле, но теперь уже на большом расстоянии от космической станции. Большое расстояние нужно для того, чтобы эффекты общей теории относительности были заметны, то есть, чтобы

при включении двигателей и приобретении ускорения кораблём могла появиться разность потенциалов искусственного гравитационного поля, достаточная для наблюдения этим космонавтом за предметами и явлениями на станции. Подробнее можно посмотреть в [6], [8], [9] в разделах об основах Общей теории относительности и о разъяснении парадокса часов. Пусть в начальный момент скорость корабля относительно станции равна нулю, и их ускорения также равны нулю. Итак, что будет наблюдать космонавт, использующий для наблюдений световые сигналы? Пока относительная скорость ракеты и станции равна нулю, скорость хода часов на станции совпадает со скоростью хода часов на ракете, и также совпадают длины метровых линеек. Если ракета с космонавтом («космический кораблик») начинает двигаться с ускорением – меняется наблюдаемый космонавтом ход часов на станции, в соответствии с изменением разности потенциалов искусственного гравитационного поля между ракетой (космонавтом в ракете) и наблюдаемыми объектами на станции. Также, в соответствии с изменением разности потенциалов искусственного гравитационного поля между ракетой (космонавтом в ракете) и наблюдаемыми объектами на станции, меняются длины линеек. Понятно, что никакого влияния космонавт и ракета на станцию и на объекты на станции не оказывают. Следовательно, мы опять вынуждены сделать вывод, что описываемые Общей теорией относительности изменения линейных размеров тел на станции и самой станции и изменение хода часов на станции, наблюдаемые космонавтом на корабле при появлении ускорения корабля, являются именно оптическими (наблюдательными) эффектами, связанными с конечностью скорости света.

3. О физическом смысле координат в преобразовании Лоренца.

В самом деле, как правило ([1], [2], [8], [9] - иногда с некоторыми различиями в обозначениях), при выводе преобразований Лоренца или при рассмотрении основ специальной теории относительности рассматривают две инерциальных декартовых системы координат **k** (с координатами

событий x, y, z, t) и **k'** (с координатами событий x', y', z', t'), оси которых параллельны и совпадают момент $t=0$, $t'=0$, причем система **k'** движется относительно системы **k** с постоянной скоростью V в положительном направлении вдоль оси X. можно считать, что в началах систем координат находятся наблюдатели Н и Н', движущиеся относительно друг друга, причём каждый из них неподвижен в своей системе координат. Далее рассматривают световой сигнал, испускающийся из общего начала координат O и O' в момент $t=t'=0$, и распространяющийся в виде сферической световой волны со скоростью света, и рассматривают события, состоящие в прохождении светового сигнала через точки пространства x, y, z, t в системе **k** и x', y', z', t' в системе **k'**. Далее из условия эквивалентности уравнений (1) и (1')

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = 0 \qquad (1)$$

и

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2t'^2 = 0 \qquad (1')$$

а также соображений о линейности формул преобразований - формул пересчёта от одной системы координат к другой получают формулы преобразований Лоренца:

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + \frac{V^2}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \qquad (2)$$

Если рассматривать процесс распространения светового сигнала в обратном направлении, от точек (событий) $x, y, z, -t$ в системе **k** и $x', y', z', -t'$ в системе **k'** к наблюдателям Н и Н', находящимся в началах соответствующих систем координат O и O', совпадающих в момент $t=t'=0$, то уравнения (2) и (2') будут также выполняться. Понятно, что и в этом случае будут получены те же выражения для преобразований Лоренца. Однако в этом случае становится более понятным физический смысл координат событий в системах **k** и **k'**, а также преобразований Лоренца. Наборы координат x, y, z, t - это наборы координат событий, которые видит наблюдатель Н, находящийся в начале системы координат **k** (и неподвижный

относительно неё), а наборы координат x', y', z', t' - это наборы координат событий, которые видит наблюдатель Н', находящийся в начале системы координат **k'**, неподвижный относительно этой системы координат. При этом оба наблюдателя используют для наблюдений свет (электромагнитные сигналы). Это подтверждает наш вывод о том, что описываемые преобразованиями Лоренца изменения линейных размеров тел на станции и самой станции и замедление хода часов на станции, наблюдаемые космонавтом на корабле, являются именно наблюдательными эффектами, связанными с конечностью скорости света, а также с постоянством скорости света во всех инерциальных системах координат. Можно добавить, что и любой неподвижный относительно системы **k** наблюдатель может наблюдать те же события с теми же координатами x, y, z, t, что и наблюдатель Н, вводя несложные поправки. Аналогично, любой неподвижный относительно системы **k'** наблюдатель может наблюдать те же события с координатами x', y', z', t', что и наблюдатель Н', также вводя несложные поправки.

4. Дополнительные замечания.

В заключение нашего анализа физического смысла преобразований Лоренца и теории относительности можно добавить следующие замечания.

4.1. Очень часто в работах, книгах, учебниках по теории относительности, в разделах об относительности понятия одновременности, рассматриваются примеры с наблюдателями, движущимися относительно друг друга, и наблюдающими световой сигнал о событии (например, вспышку молнии). Таким образом, наличие наблюдателей является важным обстоятельством и при создании, и при изложении основ теории относительности, начиная с первой работы А.Эйнштейна К электродинамике движущихся тел» ([1]).

4.2. «Если x_1, y_1, z_1, t_1 и x_2, y_2, z_2, t_2 – координаты каких-либо двух событий, то величина $S_{12}=[c^2(t_2-\ t_1)^2-(x_2-\ x_1)^2-(y_2-\ y_1)^2-(z_2-\ z_1)^2]^{1/2}$ называется интервалом между этими двумя событиями» ([5], §2, стр.17). Пусть событие с координатами x_2, y_2, z_2, t_2 – это приход светового сигнала о событии с

координатами x_1, y_1, z_1, t_1 (например, вспышки молнии) к глазу наблюдателя Н. Тогда интервал S_{12} между этими событиями равен нулю. Пусть x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}, t_{1i}, $i=1..n$ – координаты всех событий, сигналы от которых приходят к глазу наблюдателя Н одновременно с событием с координатами x_2, y_2, z_2, t_2 (то есть это события, формирующие картину мира, которую наблюдает наблюдатель Н в момент t_2). Тогда очевидно, что все интервалы между событиями с координатами x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}, t_{1i}, $i=1..n$ и с событием с координатами x_2, y_2, z_2, t_2 равны нулю. Отметим, что некоторые из событий с координатами x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}, t_{1i}, $i=1..n$ могут быть разделены с событием с координатами x_2, y_2, z_2, t_2 временем в миллиарды лет и расстоянием в миллиарды световых лет. Например, если одно из событий с координатами x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}, t_{1i}, $i=1..n$ - это вспышка сверхновой в далёкой галактике. Этот факт, по-видимому, также указывает на глубокую связь свойств интервала и наблюдательных (видимых) эффектов, которые имеют место при наблюдениях за различными объектами с помощью света, который оказывается весьма несовершенным средством вследствие конечной скорости распространения.

4.3. В книге [11] (А.А.Логунов, «Лекции по теории относительности и гравитации: Современный анализ проблемы», Москва, “Наука”, 1987г.) на странице 23 читаем: "Мы видим, таким образом, что уравнения Максвелла-Лоренца, описывающие электромагнитные явления, открыли нам, что пространство и время едино и геометрия его псевдоевклидова. Когда изучались электромагнитные явления и даже тогда, когда были открыты уравнения Максвелла-Лоренца, никто не предполагал, что они изменят сложившееся представление пространстве и времени. Изучение электромагнитных явлений привело к открытию фундаментальной важности - пространство и время едино и геометрия его псевдоевклидова . Этим открытием мы в высшей степени обязаны Пуанкаре и Минковскому. Пуанкаре первым открыл, что величина (впоследствии названная интервалом)

$$c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2$$

инвариантна относительно группы Лоренца."

Так как уравнения Максвелла описывают распространение электромагнитных волн, которые являются средством наблюдения, то понятно, что эти уравнения записаны в наблюдаемых координатах, то есть в тех, в которых видит явление наблюдатель, использующий свет (электромагнитные волны) для наблюдений. Естественно, как сопутствующее свойство, для этих координат мы получаем инвариантность относительно преобразований Лоренца ([5], стр.22-25). К этому можно добавить, что именно наблюдаемый с помощью света (электромагнитных волн, сигналов) мир является псевдоевклидовым.

4.4. Так как мы используем для наблюдений в основном световые (электромагнитные) сигналы, распространяющиеся со скоростью света, мы будем наблюдать именно такие эффекты, которые рассчитаны с применением преобразований Лоренца и теории относительности. Таким образом, предложенное понимание физического смысла преобразований Лоренца а также теории относительности согласуется со всеми наблюдаемыми эффектами, которые считаются доказательствами её справедливости.

4.5. Возможно, более точным названием теории относительности было бы примерно такое: "Теория наблюдений с помощью света (электромагнитных волн, сигналов), имеющего конечную скорость распространения, за движущимися объектами, в том числе при наличии гравитационного поля".

Заключение

Итак, можно кратко сформулировать наш вывод. Физический смысл координат событий в формулах преобразований Лоренца состоит в том, что это координаты событий, которые наблюдают с помощью света (электромагнитных волн, сигналов) наблюдатели, неподвижные относительно своих систем координат. Свет является несовершенным

средством наблюдения вследствие конечности скорости распространения. Такое понимание физического смысла координат событий в преобразованиях Лоренца согласуется со всеми наблюдаемыми эффектами, которые считаются доказательствами справедливости теории относительности, а также позволяет сделать теорию относительности совместимой с обыкновенным здравым смыслом.

К этому следует добавить, что возникает необходимость тщательного анализа выводов, сделанных на основе теории относительности, и выяснения их физического смысла. Вполне возможно, что некоторые привычные интерпретации наблюдаемых явлений придётся изменить.

Литература:

1. А. Эйнштейн, «К электродинамике движущихся тел», Собрание научных трудов в четырех томах. Том 1, стр. 7-35. Москва, "Наука", 1965г.

1. А. Эйнштейн, «Теория относительности», Собрание научных трудов в четырех томах. Том 1, стр. 410-424. Москва, "Наука", 1965г.

3. А. Эйнштейн, «Физика и реальность», Собрание научных трудов в четырех томах. Том 4, стр. 200-227. Москва, "Наука", 1967г.

4. А. Эйнштейн, «Физика и реальность» Сборник статей», Москва, “Наука”, 1965г.

5. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц, «Теория поля», Москва, "Наука", 1988г.

6. Д.В. Скобельцын, «Парадокс близнецов в теории относительности», Москва, "Наука", 1966г.

7. М. Борн, «Эйнштейновская теория относительности», Москва, "Мир", 1972г.

8. Р.Толмен, «Относительность, термодинамика и космология», Москва, “Наука”, 1974г.

9. К. Мёллер, «Теория относительности», Москва, "Атомиздат", 1975г.

10. И.Д.Новиков, «Четырёхмерный интервал», БСЭ, третье издание. Том 29, М., "Советская Энциклопедия" 1978г.

11. А.А.Логунов, «Лекции по теории относительности и гравитации: Современный анализ проблемы», Москва, “Наука”, 1987г.

12. Джей Орир. «Физика. Полный курс. Примеры, задачи, решения» Москва, КДУ, 2010г.